

Sachbericht (Schlussbericht)

zum Verwendungsnachweis

zu FuE Vorhaben

Reg.-Nr.:	MF100039
FuE-Einrichtung:	Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.
Titel:	Orientierte Fasergelege für Thermoplastleichtbaustrukturen
Projektlaufzeit:	01.01.2011 – 30.06.2013

Rudolstadt, den 31.01.2014

Name und Telefonnummer des Projektleiters: Dipl.-Ing. Gerald Ortlepp 03672-379 313

Firmenstempel

Unterschrift des Projektleiters

rechtsverbindliche Unterschrift

Inhalt	Seite
Danksagung	3
1 Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens	4
2 Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse	5
2.1 Versuchsmaterialien	5
2.2 Materialaufbereitung	5
2.3 Eingesetzte technische Aggregate	5
2.4 Fasercharakterisierung	6
2.5 Krempelversuche – Faserschädigung, Anisotropie und Florgleichmäßigkeit	6
2.6 Winkelgenaue Florablage und Aufbau winkelanisotroper Vlieshalbzeuge	9
2.7 Mechanische Verstärkungswirkung anisotroper, winkelgenau abgelegter Faserflorschichten in verschiedenen Thermoplastmatrices	12
2.7.1 Einfluss des Verstärkungsfasergehaltes in einem Faserverbundwerkstoff auf die Ausbildung der Anisotropiefaktoren	12
2.7.2 Einfluss der Verbundmatrix	13
2.8 Konzepte einer industriellen Nutzung	15
2.9 Zusammenfassung der Projektergebnisse	16
3 Bewertung der Ergebnisse, gemessen an den Zielsetzungen des Antrages	16
4 Wirtschaftliche Verwertung der Vorhabensergebnisse und aktualisierter Verwertungsplan	17
4.1 Projektergebnisse mit Verwertungspotenzial	17
4.2 Zielgruppen für die verwertbaren Projektergebnisse	17
4.3 Markt- und Wettbewerbssituation	18
4.3.1 Markt- und Wettbewerbssituation für faserorientierte Karbon- und Aramidfasermatten	18
4.3.2 Markt- und Wettbewerbssituation für den Bereich Naturfaserstoffe	19
4.3.3 Marketing und Vertriebskonzeption	20
4.3.4 Eigene Umsatzerwartungen und wirtschaftliche Effekte	21
4.3.5 Nutzung der F&E-Ergebnisse in Drittunternehmen	21
4.3.6 Transferkonzeption	21
5 Bewertung des aktualisierten Verwertungsplanes im Vergleich zum ursprünglichen Verwertungsplan	23
6 Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse	24
7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	24
Literaturquellen	25

Danksagung

Wir danken der EuroNorm GmbH für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens MF100039, das als Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie im Rahmen der „FuE-Förderung gemeinnütziger externer Industrieforschungseinrichtungen in Ostdeutschland – Innovationskompetenz Ost“ (INNO-KOM-Ost) - Modul: Marktorientierte Forschung und Entwicklung (MF) erfolgte.

Weiterhin danken wir der SGL Automotive Carbon Fibers GmbH & Co. KG in Wackersdorf sowie der TEIJIN ARAMID GmbH in Wuppertal für die Bereitstellung von Versuchsmaterialien und die fachliche Unterstützung.

1 Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Gegenwärtig werden für Faserverbundwerkstoffe im Hochleistungsbereich Endlosverstärkungsfasern in Form von Multifilamentgarnen, Rovings oder Kabeln auf Basis von Karbon, Glas oder Aramid eingesetzt. Mit mathematischen Modellen ist es möglich, mit solchen Endlosfaserstrukturen die späteren Bauteile bezüglich Geometrie, Faserstoff, Faserausrichtung und Faserkonzentration gezielt auszulegen.

Bisher ist es industriell nur möglich, endlose Fasern mit dem Stand der Technik genau richtungsdefiniert in einem textilen Verstärkungshalbzeug in Form von Gelegen, Geweben und Geflechten anzuordnen.

Mit endlichen Fasern, wie sie beispielsweise aus textilen Recyclingprozessen von Produktionsabfällen oder aus Faserverbundrecyclingprozessen zunehmend anfallen oder aus den natürlichen Gegebenheiten der Naturfasern resultieren, werden bisher industriell keine definiert faserorientierten Verstärkungshalbzeuge hergestellt. Potentiell bestünde die Möglichkeit, über eine Faserverspinnung wieder ein Endlosfasergarn aus endlichen Fasern zu produzieren. Dies ist jedoch ein sehr kostenintensiver Weg, der nur bei Reißaramid und Naturfasern technisch gelöst ist, sich im industriellen Maßstab zur Verstärkung von Kunststoffmatrices bisher jedoch nicht durchgesetzt hat.

Ziel des Projektes ist deshalb die Entwicklung von flächigen, mattenähnlichen, textilen Halbzeugen auf Basis endlicher Verstärkungsfasern, die eine hohe Faserorientierung aufweisen. Die richtungsabhängige Verstärkungswirkung solcher Verstärkungshalbzeuge soll dabei an der Thermoplastmatrix Polypropylen und entsprechend des Gutachterhinweises mit Polyester modellhaft untersucht werden.

Als Verstärkungsfaserstoffe werden endliche Recyclingkarbonfasern, para-Aramid-Recyclingfasern und Flachs als Vertreter einer typisch in Faserverbunden verwendeten Naturfaser eingesetzt. Als faserorientierende, kostengünstige und marktverfügbare Technik wird das Krempeln zu dünnen Faserfloren in Kombination mit einer neuen Winkelablagetechnik in $\pm 45^\circ$, 90° - sowie 0° -Orientierung untersucht und verfahrensoptimiert.

Als Grundlage dienen das im TITK über Jahre entwickelte Know-how und das technische Equipment zur Gewinnung langer, krempelfähiger Recyclingfasern aus textilen Aramid- und Karbonabfällen, deren Verarbeitung mittels Krempeltechnik zu Bändern und Vliesstoffen sowie die Erfahrungen im Bereich der textilen Verarbeitung technischer Naturfasern zu Verstärkungshalbzeugen für Faserverbundwerkstoffe. Als zweite tragende Säule im beantragten Projekt sollen die Erfahrungen des TITK im Bereich der Faserverbundherstellung mittels unterschiedlicher Verfahren im labor- und kleintechnischen Maßstab sowie die vorhandenen Prüflabore zur Charakterisierung von Faserstoffen, textilen Halbzeugen bis hin zum Faserverbundwerkstoff genutzt werden.

2 Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

2.1 Versuchsmaterialien

Für die durchzuführenden Versuchsreihen wurden folgende Materialien als Quelle für die einzusetzenden Verstärkungsfasern beschafft:

- para-Aramid-Reißfasern
- flächige Karbonfaserabfälle in Form von vernähten Gelegeabfällen
- technische Flachsfasern

Als thermische Bindekomponenten wurden Polypropylenfasern 7 dtex / 60 mm, Polyamid 6 – Fasern 3,3 dtex / 60 mm, Polyesterfasern 5,5 dtex / 60 mm sowie PP-Folie eingesetzt.

2.2 Materialaufbereitung

Die Aufbereitung der Materialien zu krepelbaren Faserstoffen erfolgte nach folgendem Schema:

Verstärkungsmaterial	Fasergewinnung durch mechanisches Zerfasern	Faseröffnen	pneumatische Materialausreinigung
para-Aramidreißfasern		X	
flächige Karbonfaserabfälle	X	X	X
technischer Flachs		X	X

Tab. 1: Angewandte Materialaufbereitung in Abhängigkeit vom Verstärkungsfasermaterial

Für die Aufbereitung der flächigen Karbonfaserabfälle wurde das im TITK entwickelte Mühlenrecyclingverfahren eingesetzt. Die flächigen Abfälle wurden zu Stücken in Abmessungen von etwa 50 mm Kantenlänge geschnitten und anschließend mit einer technisch modifizierten Mühle zerfasert. Nach der Gewinnung der CF-Recyclingfasern wurden diese pneumatisch von Kurzfasern und Faserstaub befreit. Bei der Aufbereitung der ungerösteten Naturfaser Flachs wurde das Material vom Ballen kommend ebenfalls mechanisch einpassagig geöffnet und pneumatisch entstaubt. Bei Einsatz des Reißaramids wurde das Material vor dem Öffnen mit einer Antistatikpräparation Tallopol KSB der Fa. Bozzetto ausgerüstet. Sie sicherte die Materialverarbeitbarkeit und verhinderte elektrostatisch bedingte Materialablagerungen an Maschinenteilen und Wickelbildungen an Öffnerwalzen. Die thermoplastischen PES- und PP-Fasern wurden vor ihrem Einsatz vorgeöffnet und über die Bildung eines Mischbetts zu den entsprechenden Mischungen mit den Verstärkungsfasern innig vermischt.

2.3 Eingesetzte technische Aggregate

- Fallmesserschneidmaschine zur Vorzerkleinerung
- textiler Faserstofföffner zum Öffnen und Fasermischen
- modifizierte Mühlentechnik zum Zerfasern von Gelegeabfällen
- Technisch modifizierte Krepel zur Florbildung mit einer Arbeitsbreite von 70 cm
- Spezialflorleger zum winkelgenauen Legen von Krempelfloren
- Nadelmaschine zur mechanischen Verfestigung der Fasergelege
- Doppelbandpresse zur thermischen Verfestigung der Fasergelege
- Etagenpresse zur Herstellung von Faserverbundplatten zur Kennwertermittlung

Alle eingesetzten Aggregate wurden an die Besonderheiten der kritischsten Verstärkungsfasern – die Karbonfaser – sowohl technisch als auch arbeits- und anlagenschutzseitig angepasst.

2.4 Fasercharakterisierung

An allen eingesetzten Verstärkungsfasern wurden textilphysikalische Prüfungen zur Ermittlung der für Kunststoffverstärkungen wichtigen Kennparameter vorgenommen. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

Kennwert	Einheit	Bestimmung	gerissenes para-Aramid	Recycling- Carbonfasern	technischer Flachs
Faserstoffdichte	[g/cm ³]	Tabellenwert	1,45	1,8	1,5
Feinheit	[dtex]	DIN EN ISO 1973	1,7	0,75	65,7
Faserdurchmesser	[µm]		12,2	7,3	74,7
feinheitsbezogene Reißkraft	[cN/dtex]	DIN EN ISO 5079	175	232	47,1
Höchstzugkraft	[N/mm ²]		2537,5	4176	706,5
E-Modul (0,5 - 0,7%)	[cN/dtex]	DIN EN ISO 5079	3531	9391	1561
	[kN/mm ²]		51,1995	169,038	23,415
Faserlänge	[mm]	Einzelfaserlängen- messung	33,3		65,4
mittlere Länge von Faserbündeln	[mm]	Sonderprüfverfahren		36,2	

Tab. 2: Kennwerte der eingesetzten Verstärkungsfasern nach allen Aufbereitungsstufen

Es zeigte sich, dass mit dem Einzelfaserlängenmessverfahren aufgrund der Fasersprödigkeit keine Karbonfasern sicher gemessen werden können, da die Faserprobe beim Materialhandling durch ausgelöste Faserbrüche unzulässig beeinträchtigt wurde. Um dennoch eine Aussage zu einem Faserlängenmerkmal zu bekommen, wurde diese Prüfung an mechanisch stabileren Faserbündeln vorgenommen. Die Prüfung erfolgt hier unabhängig von der Bündeldicke an 100 Faserbündeln.

2.5 Krempelversuche – Faserschädigung, Anisotropie und Florgleichmäßigkeit

Die textile Krempel- bzw. Kardiertechnik ist die einzige marktverfügbare Technik, um endliche Faserstoffe in einem dünnen massegleichmäßigen Faserflor längs orientiert anzuordnen. Auf einer verfügbaren, technisch modifizierten Musterkrempel der Fa. Memmingen wurden aufbauend auf den TITK-Erfahrungen des Krempelns von Aramid-, Natur- und Karbonfasern erste Krempelversuche bei 30 g/m² Florflächenmasse mit diesen speziellen Recyclingmaterialien durchgeführt. Jede mechanische Faserbearbeitung führt zu einer Faserschädigung, die sich in einer Fasereinkürzung bis hin zu mechanischen Kennwertverlusten bemerkbar macht. In einem ersten Schritt wurde der Faserschädigungsgrad durch den Krempelprozess untersucht:

Kennwert	Einheit	Bestimmung	gerissenes para-Aramid		Recycling-Carbonfasern		technischer Flachs	
			A	B	A	B	A	B
Faserstoffdichte	[g/cm³]	Tabellenwert	1,45	1,45	1,8	1,8	1,5	1,5
Feinheit	[dtex]	DIN EN ISO 1973	1,7	1,7	0,75	0,75	65,7	44,6
Faserdurchmesser	[µm]		12,2	12,2	7,3	7,3	74,7	61,5
feinheitsbez. Reißkraft	[cN/dtex]	DIN EN ISO 5079	175	138	232	225	47,1	40,1
Höchstzugkraft	[N/mm²]		2537,5	2001	4176	4050	706,5	601,5
E-Modul (0,5 - 0,7%)	[cN/dtex]	DIN EN ISO 5079	3531	2530	9391	9405	1561	1476
	[kN/mm²]		51,1995	36,685	169,038	169,29	23,415	22,14
Faserlänge	[mm]	Einzelfaserlängenmessung	33,3	32,2			65,4	47,7
mittlere Länge von Faserbündeln	[mm]	Sonderprüfverfahren			36,2	nicht prüfbar		

Tab. 3: Wirkung eines Krempelprozesses auf textilphysikalische Faserkennwerte
(A ... vor der Krempel, B ... nach der Krempel)

Erwartungsgemäß führte der Krempelprozess zu Fasereinkürzungen, Faserlängsspaltungen (Verfeinerung) beim Flachs sowie generellen Festigkeits- und Modulverlusten. Die geringsten Verluste waren an den Recyclingkarbonfasern und die höchsten Verluste am bereits durch den Reißprozess vorgeschädigten Reißaramid festzustellen.

Zur Bestimmung der Faserlängsorientierung bzw. Anisotropie der Krempelflore wurden diese bei gleicher Ausrichtung übereinander angeordnet zu einem PP- bzw. PES-Prüfplattenverbund verarbeitet. Aus diesen Platten wurden Zugprüfstreifen längs und quer zur Floraufrichtung herausgeschnitten und daran der Zug-E-Modul ermittelt. Das Verhältnis von Längs- und Quermodul diente als Maß für die erreichte Anisotropie. In den Bildern 1 und 2 wurden die Ergebnisse grafisch dargestellt.

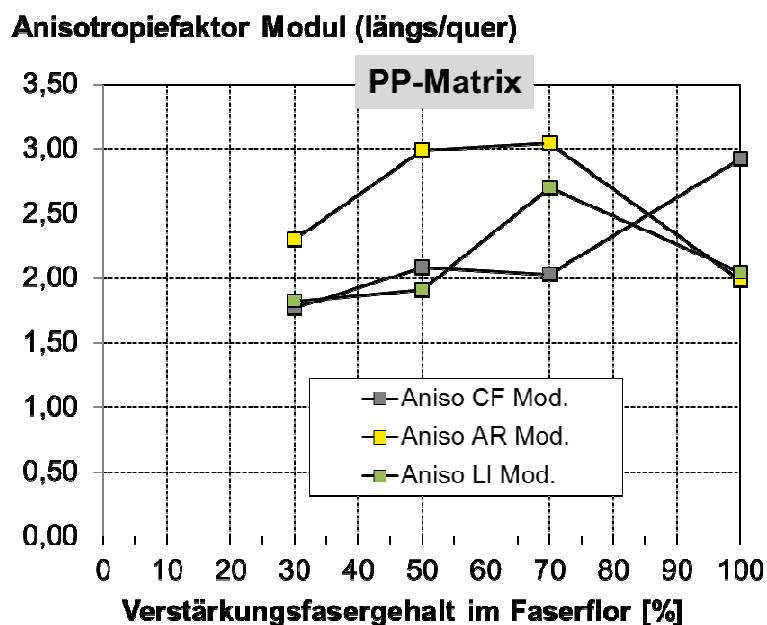


Bild 1: Verstärkungsanisotropie in einem faserverstärkten PP-Verbund bei unterschiedlichen Verstärkungsfasern und Verstärkungsfasergehalten bei der Florbildung mittels Krempel

Wie aus den Ergebnissen im Bild 1 ersichtlich, verhielten sich die 3 Verstärkungsfasertypen unterschiedlichen bezüglich ihres Orientierungsverhaltens mit einer Krempel bei Einsatz textiler Hilfsfasern. Mit abnehmendem Hilfsfaseranteil bis etwa 30% verbesserte sich die

Orientierung bei Flachs und Aramid, um bei Reinverarbeitung stark abzufallen, wohingegen bei karbon erst eine Reinverarbeitung eine deutliche Orientierungserhöhung brachte.

Verwendete man PES als textile Mischfaser, ergab sich eine analoge Tendenz (Bild 2) des negativen Einflusses textiler Faserzumischungen auf die Anisotropie.

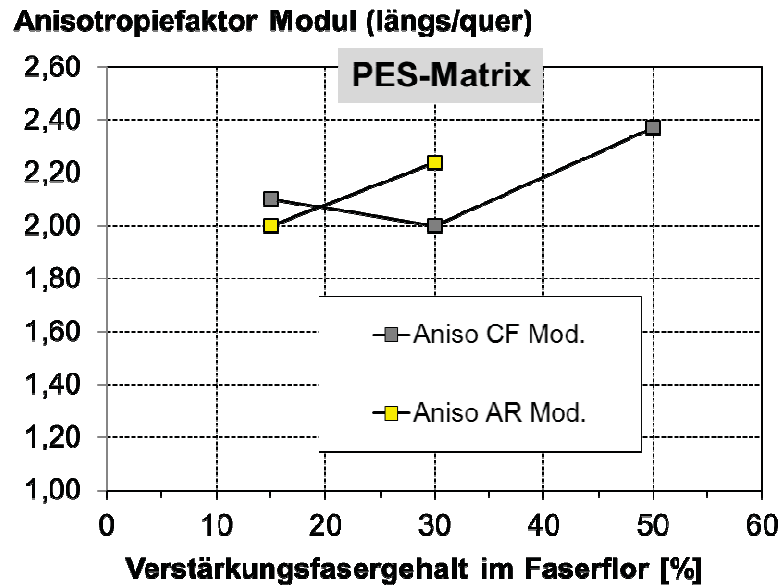


Bild 2: Verstärkungsanisotropie in einem faserverstärkten PES-Verbund bei unterschiedlichen Verstärkungsfasern und Verstärkungsfasergehalten bei der Florbildung mittels Krempel

An Krempelfloren aus 100% Verstärkungsfasern wurde die Florflächenmassegleichmäßigkeit an jeweils 125 über die Florbreite und –länge ausgestanzten Probestücken 10 cm x 10 cm ermittelt. Im Bild 3 wurden die Ergebnisse grafisch dargestellt.

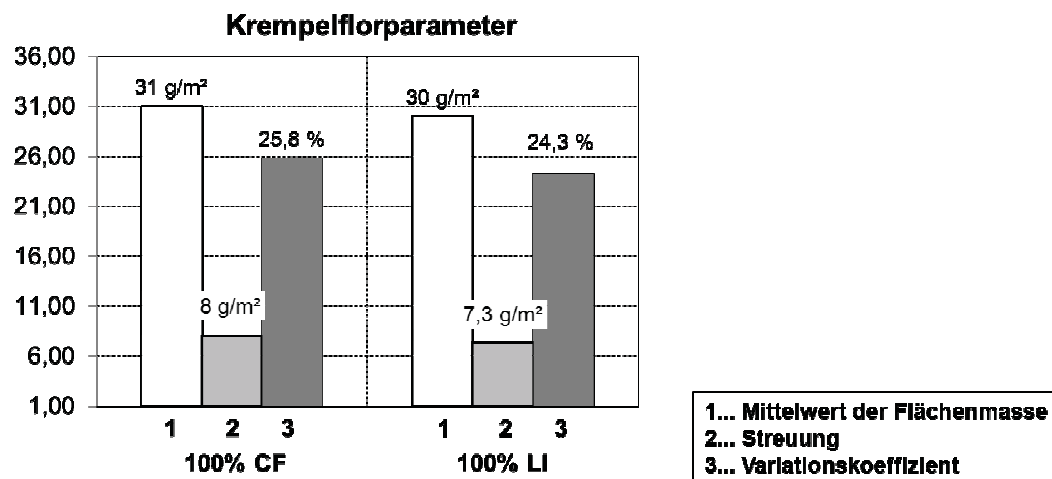


Bild 3: Parameter von Krempelfloren aus 100% CF und LI

Das Ausstanzen von Probestücken aus 100% AR-Krempelflor bereitete aufgrund der hohen Schnittfestigkeit der Fasern extreme Probleme, so dass auf die Bestimmung der Kennwerte verzichtet werden musste.

2.6 Winkelgenaue Florablage und Aufbau winkelanisotroper Vlieshalbzeuge

Im folgenden Bild 4 wurde das Prinzip des Aufbaus winkelanisotroper Vlieshalbzeuge auf der Grundlage faserorientierter Krempelflore skizziert. Es zeigt die Versuchsvarianten mit Vlieshalbzeugen für den Verbundsektor in den üblichen Faserorientierungen aus der Endlosverstärkungsfaseranwendung 0° und 90° (Gewebe, Gelege), sowie $\pm 45^\circ$ (Gelege).

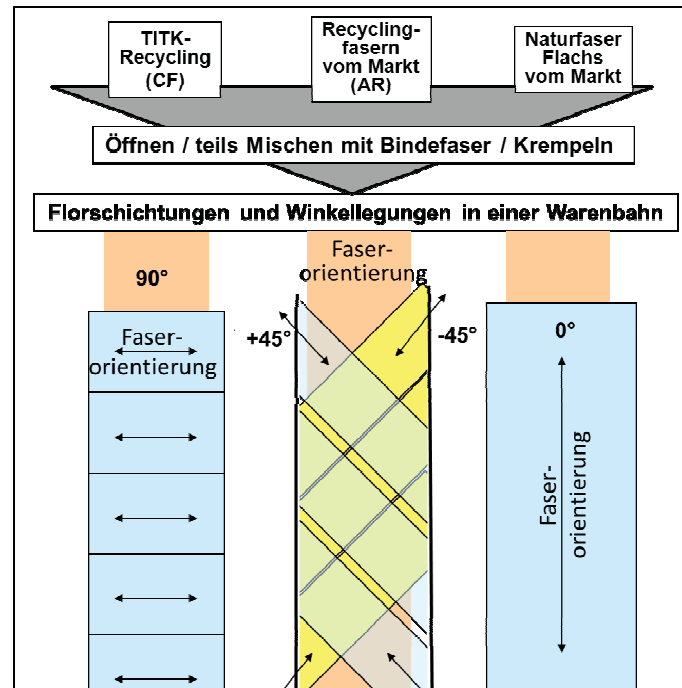


Bild 4: Legeversuche mit 0° , 90° und $\pm 45^\circ$ Krempelflorlegewinkel

Zur Realisierung dieser Produktaufbauten wurde ein Prototyp eines Speziallegers eingesetzt, der mit Endlosfaserflor von einer Krempel gespeist wird und das Krempelflor winkelgenau auf einem Florablageband lückenlos nebeneinander bis dachziegelartig überlappend für höhere Vlieshalbzeugflächenmassen ablegen kann. Das folgende Bild 5 zeigt die Gesamtanlage in Verbundfahrweise.

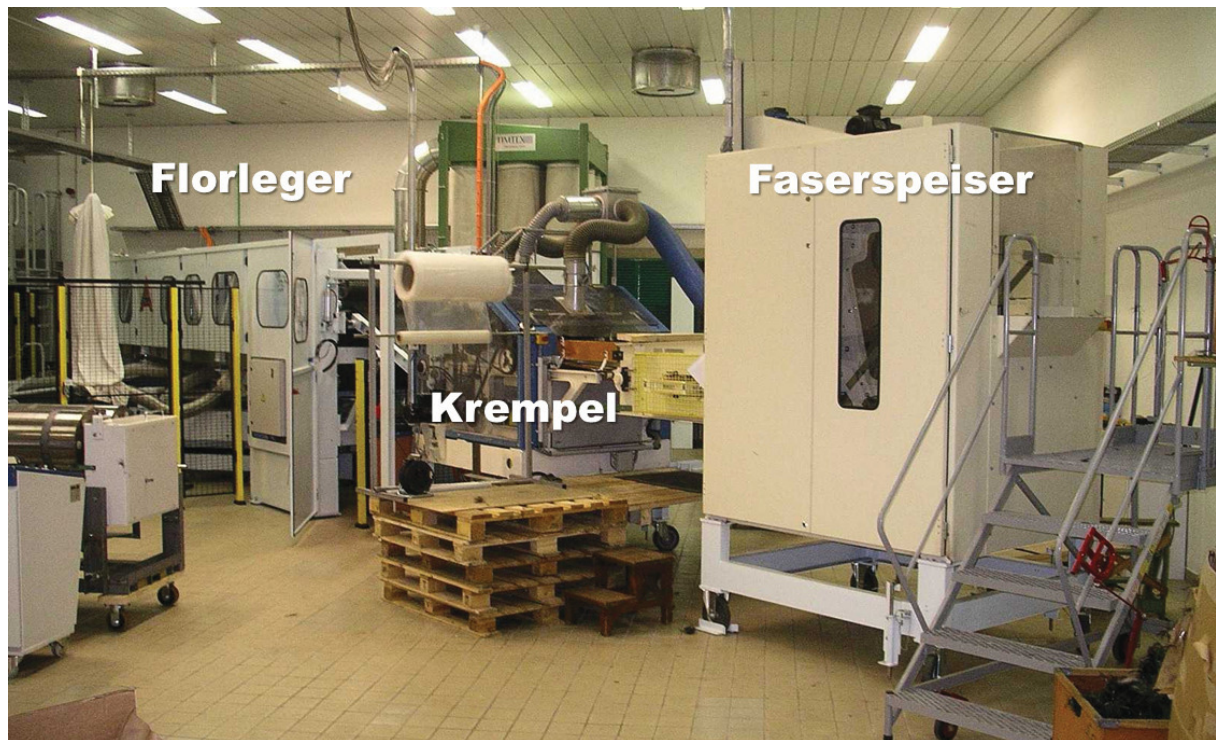


Bild 5: Gesamtanlage zur Erzeugung von Verstärkungsfaservlieshalbzeugen mit winkeldefinierter Faservorzugsausrichtung

Mit dieser Anlagenkonfiguration, mit der es erstmals technisch möglich war, winkelgenau von einer Krempel oder einem Vorratsspeicher kommende Faserflorbahnen definiert übereinander zu legen, wurden folgende Legesituationen realisiert:

- a) 2 Flore deckungsgleich übereinander
- b) 3 Flore deckungsgleich übereinander
- c) 10 Flore deckungsgleich übereinander
- d) Florablage im dachziegelartigen Versatz von 5 cm
- e) Florablage im dachziegelartigen Versatz von 10 cm und
- f) Florablage im dachziegelartigen Versatz von 20 cm.

Folgende Ergebnisse bezüglich der Massegleichmäßigkeit der Schichtungen stellten sich ein.

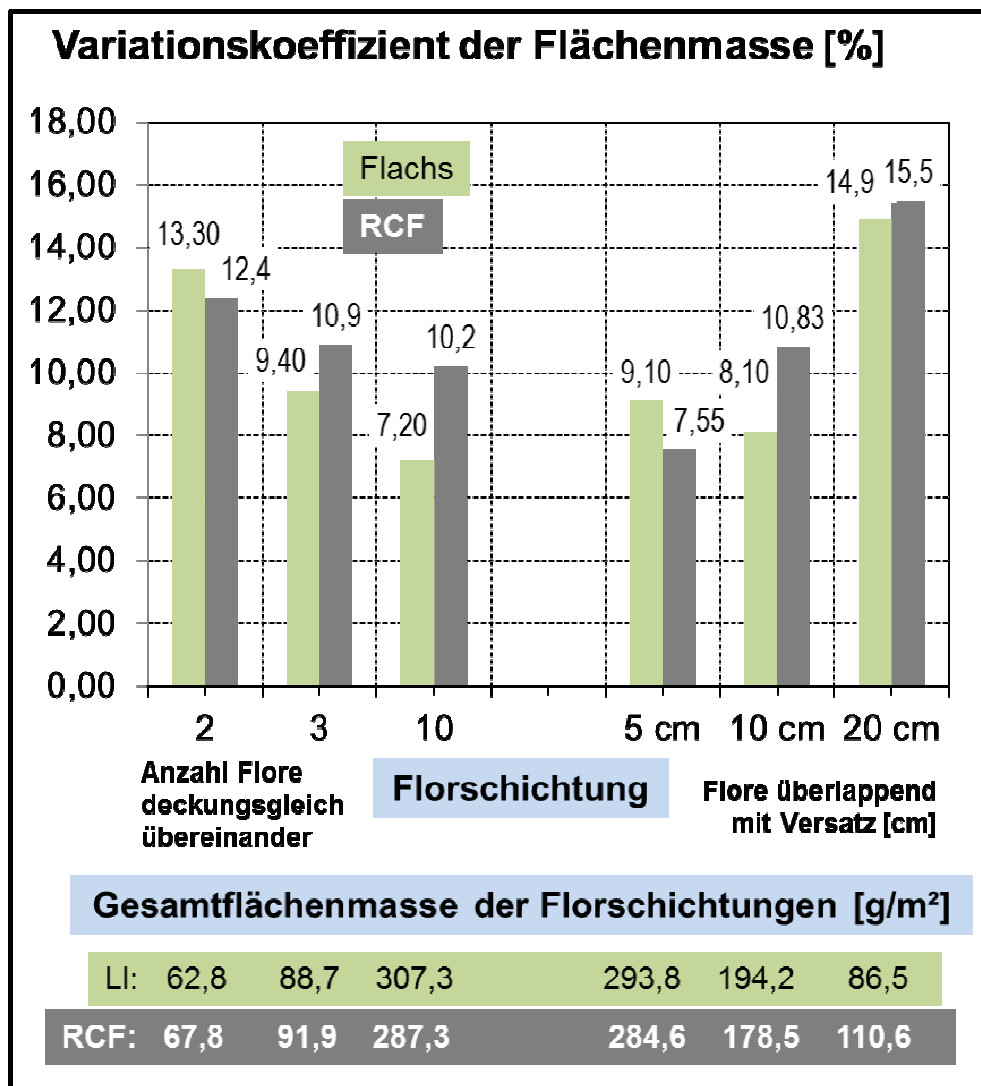


Bild 6: Flächenmassegleichmäßigkeit unterschiedlicher Florschichtungen

Wie hieraus erkennbar, erhöht sich die Flächenmassegleichmäßigkeit bei gleichzeitiger Flächenmassezunahme mit kleiner werdendem Versatz der Florschichtungen. Aus den Flächenmassegleichmäßigkeitsbetrachtungen empfiehlt es sich nicht, einen Versatz über 20 cm bei einer Florbreite von 70 cm, d.h. etwa 30% der Krempelflorbreite anzuwenden. Damit ergibt sich eine Untergrenze für diese Legetechnologie von 100 g/m². Mit steigender Flächenmasse verbessert sich die Gleichmäßigkeit der gelegten Faserschicht durch die Wirkung zunehmender Florlagendoublierung.

In der angestrebten Anwendung des Einsatzes solcher gelegten definiert hoch orientierten Faserschichten für den Faserverbundsektor werden Flächenmassen im Bereich von 1000-4000 g/m² benötigt – ein Flächenmassebereich, der mit dieser Technologie sehr gut bedient werden kann.

Um die winkelgenauen Florlagengelege für einen Einsatz im Faserverbundsektor nutzen zu können, müssen diese verfestigt werden, ohne die erzeugte Faseranisotropie zu beeinträchtigen. Hierfür wurden die Möglichkeiten einer thermischen Verfestigung zugesetzter, matrixkonformer Binfedern sowie eine leichte Vernadelung untersucht.

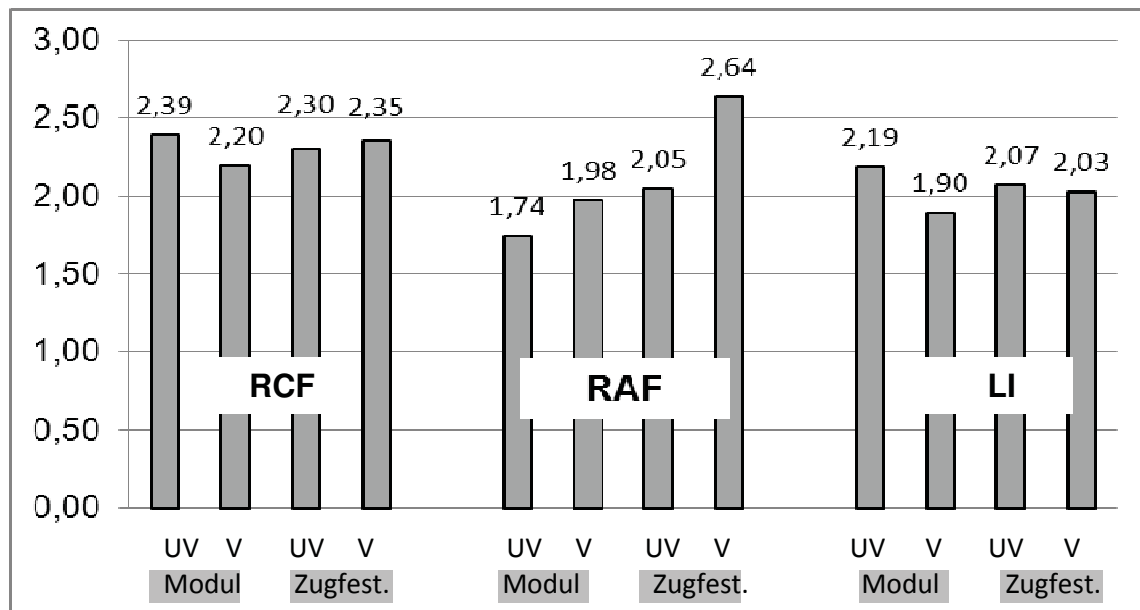


Bild 7: Anisotropiewerte von unverfestigten (UV) und leicht vernadelten (V) Krempelfloren aus 100% Verstärkungsfasern in einer PP- Faserverbundplatte mit 50% Fasergehalt

Wie aus dem Bild 7 ersichtlich, war es möglich durch eine leichte Vernadelung einerseits Handlingstabilität für solche vliesartigen Faserhalbbezeuge bei gleichzeitig unbeeinflusster Faserorientierung (Faseranisotropie) als eine Voraussetzung praktischer Anwendbarkeit zu erreichen.

2.7 Mechanische Verstärkungswirkung anisotroper, winkelnau abgelegter Faserflorschichten in verschiedenen Thermoplastmatrices

2.7.1 Einfluss des Verstärkungsfasergehaltes in einem Faserverbundwerkstoff auf die Ausbildung der Anisotropiefaktoren

Um den Einfluss des Fasergehaltes in einem Faserverbundwerkstoff auf die Ausbildung von Anisotropien der mechanischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden alle 3 Verstärkungsfasern in Form leicht vernadelter in 90° gerichtet gelegter Krempelflore zu Faserverbundprüfplatten mit 30% und 50% Fasergehalt in einer PP-Matrix verarbeitet und an daraus entnommenen Zugprüfstäben Zugfestigkeiten und Zug-E-Moduli in Faserrichtung und im Winkel von 90° zur Faserrichtung ermittelt. Das folgende Diagramm im Bild 8 zeigt die Ergebnisse.

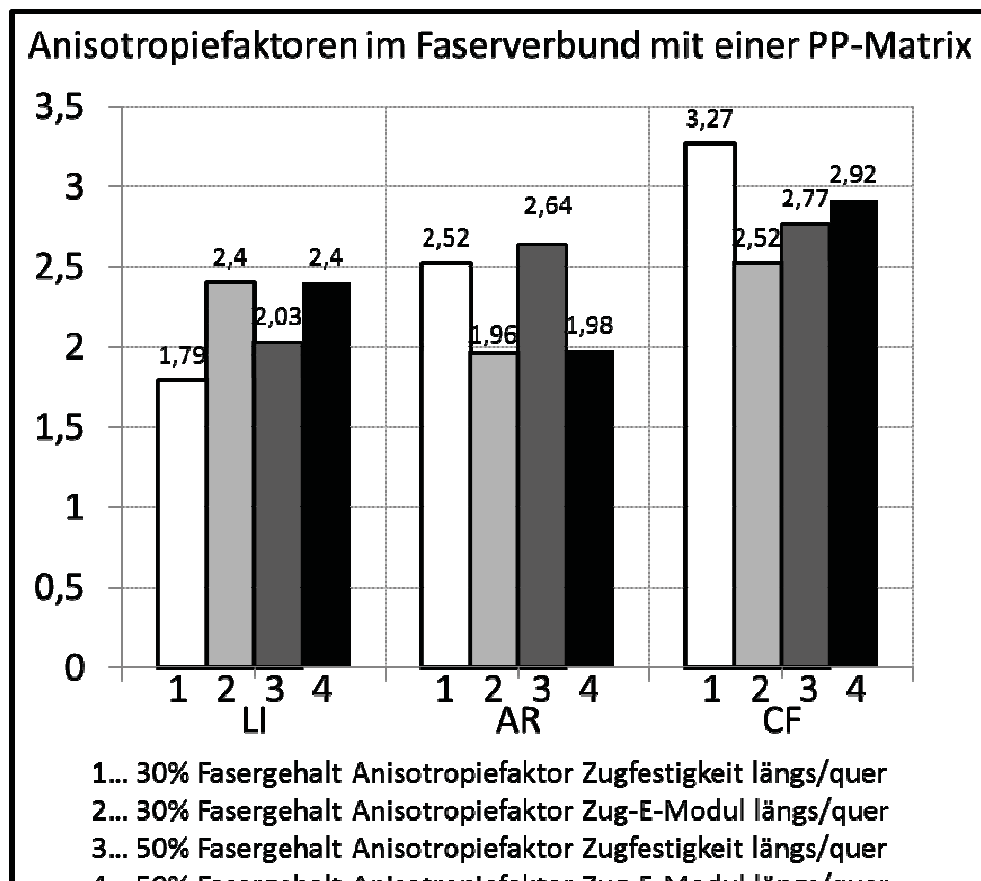


Bild 8: Anisotropiewerte in PP- Faserverbundplatten mit 30% und 50% Fasergehalt

Wie aus dem Bild 8 ersichtlich, wurden die mit gerichteten Krempelfloren möglichen Anisotropien der mechanischen Grundeigenschaften in einem Faserverbund nicht vom eingestellten Fasergehalt beeinflusst.

2.7.2 Einfluss der Verbundmatrix

Zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Thermoplastmatrices wurden in einer Richtung orientierte, leicht vernadelte Lagen von Krempelfloren bei einem Fasergehalt von 50% in eine PP-, eine PA6 und eine PES-Matrix eingebettet. Aufgrund der hohen Schmelzpunkte von PA6 und PES > 200°C konnten diese Matrices nicht für Flachs eingesetzt werden. Die beiden folgenden Diagramme (Bilder 9 und 10) zeigen die Ergebnisse der Verbundprüfung längs und quer zur Faserorientierung.

Die PP-Matrix ergab die niedrigsten Kennwerte. Die PA6-Matrix führte zu den höchsten Zugfestigkeiten und die PES-Matrix ergab die höchsten Steifigkeiten. Bezüglich der generellen Verstärkungswirkung lag Flachs erwartungsgemäß am niedrigsten, gefolgt von AR und CF mit den höchsten Kennwerten.

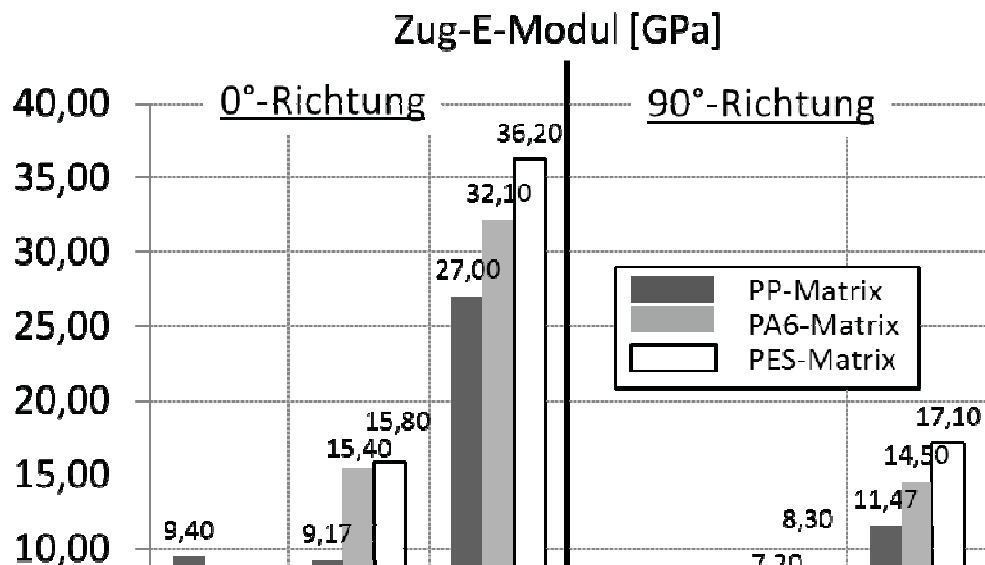


Bild 9: Einfluss der Thermoplastmatrix auf den Zug-E-Modul in einem Faserverbund bei Fasergehalten von 50%

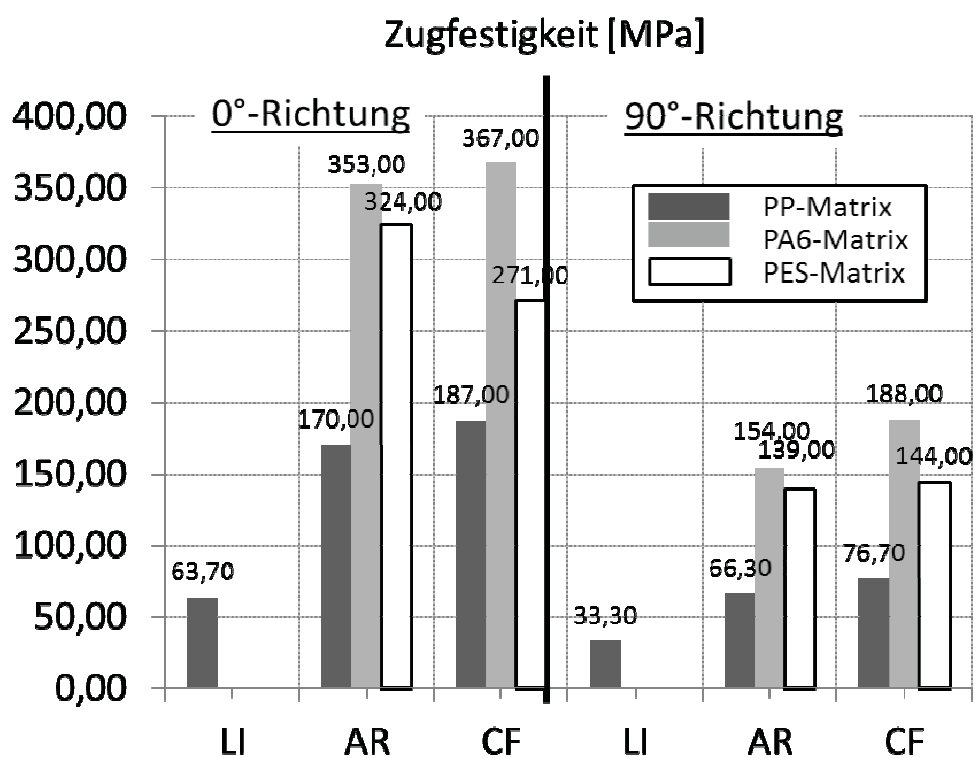


Bild 10: Einfluss der Thermoplastmatrix auf die Zugfestigkeit in einem Faserverbund bei Fasergehalten von 50%

2.8 Konzepte einer industriellen Nutzung

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und des Tests eines Speziallegers zur winkelgenauen Ablage von Krempelfloren ergeben sich folgende Konzepte für eine industrielle Nutzung:

Bild 11: Nutzungskonzepte für die neuartige Legetechnik von leichten, längs orientierten Faserschichten

Mit solch einer Anlagenanordnung könnten heute übliche Halbzeugkonstruktionen in Form von Gelegematten aus Endlosrovings mit orientierten Faserschichten aus endlichen Verstärkungsfasern gefertigt werden. Mit der Technologie der Verarbeitung endlicher Fasern eröffnen sich hier insbesondere für die stets in endlicher Form vorliegenden Naturverstärkungsfasern völlig neue Möglichkeiten. Ähnlich neue Möglichkeiten ergeben sich für die Wiederverwertung von endlichen Recyclingfaserstoffen im Längenbereich von 30 – 10 mm. Eingebettet würde sich folgendes Gesamtkonzept einer industriellen Nutzung darstellen lassen.

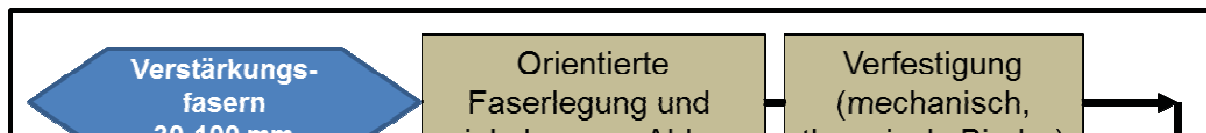


Bild 12: Nutzungskonzepte für das winkelgenaue Legen von orientierten, dünnen Faserschichten

2.9 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des F&E-Projektes gelang die Entwicklung von flächigen, mattenähnlichen, textilen Halbzeugen auf Basis endlicher Verstärkungsfasern, die durch einen textilen Krempelprozess eine hohe Grundfaserorientierung erhielten. Als Verstärkungsfasern wurden Karbonfasern und Aramidfasern eingesetzt, die als Produktionsabfälle oder aus Recyclingprozessen als endliche, krempelbare Fasern anfallen und die aufgrund ihrer hohen Primärfaserkosten einen hochwertigen Wiedereinsatz wirtschaftlich zwingend notwendig machen. Als weiterer Faserstoff wurde als typischer Vertreter der Naturfasern eine Flachsfasern in die Versuchsreihen einbezogen. Sie stand stellvertretend für den Naturfasereinsatz in Faserverbundwerkstoffen wie beispielsweise im Automobilbau. Mit Hilfe einer innovativen Legetechnik wurden solche hoch orientierten Krempelflore in Analogie zu den Verstärkungshalbzeugen auf Basis endloser Rovings in den Faserausrichtungswinkeln 0° , 90° und $\pm 45^\circ$ zu einem handhabbaren und für die Industrie nutzbaren Verstärkungsfaserhalbzeug für thermoplastische Matrices verarbeitet. Die erreichbaren Flächenmassen lagen im Bereich von $200 - 1000 \text{ g/m}^2$. Verfestigt wurden die Halbzeugmatten wahlweise durch Vernadeln oder thermisch. Auf diese Art und Weise resultierten mattenähnliche Faserverstärkungshalbzeuge mit definierten Faserorientierungen für den Einsatz im Faserverbundsektor.

Die verstärkende Wirkung der orientierten Faserhalbzeuge wurde in den Thermoplastmatrices PP, PA6 und PES untersucht. Hier konnten je nach Ausprägung der Orientierung Anisotropiefaktoren in den mechanischen Verbundeigenschaften bis zum Faktor 3 nachgewiesen werden.

Es wurden Technologievorschläge für eine industrielle Umsetzung und Nutzbarkeit dieses neuartigen Verfahrensansatzes erarbeitet.

3 Bewertung der Ergebnisse, gemessen an den Zielsetzungen des Antrages

Bezugnehmend auf die Zielstellung des Projektes konnten diese im Rahmen der Projektarbeiten erreicht werden. Es wurde eine komplette Prozesskette des Einsatzes von endlichen Verstärkungsfaserstoffen zur Verarbeitung faserorientierter Matthalbzeuge und deren Nutzbarkeit für den thermoplastischen Faserverbundsektor im Labor und kleintechnischen Maßstab dargestellt. Hierzu wurde der Prototyp eines neuartigen Florlegers zur winkelgenauen Florablage und Florschichtung bei einer Arbeitsbreite von 100 cm getestet und technisch/technologisch an die unterschiedlichen Faserstoffe angepasst. Für endliche aus mechanischen Aufbereitungsprozessen von Industrieabfällen gewonnene Hochleistungsfaserstoffe para-Aramid und karbon eröffnen sich neue Perspektiven des Wiedereinsatzes mit maximalem Wertschöpfungspotenzial für den Faserverbundsektor, insbesondere für den Leichtbau.

Im Bereich naturfaserverstärkter Faserverbunde werden mit diesem Verfahren neue technisch/technologische Möglichkeiten eröffnet, die die bestehenden Verfahren ergänzen und die Anwendbarkeit erweitern.

4 Wirtschaftliche Verwertung der Vorhabensergebnisse und aktualisierter Verwertungsplan

4.1 Projektergebnisse mit Verwertungspotenzial

Als Projektergebnisse mit Verwertungspotenzial werden eingeschätzt:

- 1 Das Know how zum Krempeln von Hochleistungsfasern insbesondere CF-Fasern aus mechanischen Recyclingprozessen mit den Möglichkeiten zur Unterstützung der Ausbildung einer hohen Faserlängsausrichtung in Krempelforen in Abhängigkeit zum eingesetzten Verstärkungsfasertyp Flachs, Aramid oder Karbon.
- 2 Das Know how zum winkelgenauen Ablegen von Krempelfloren mittels eines technisch modifizierten Florlegers zur Nutzung in Halbzeugen aus Recyclingverstärkungsfaserstoffen für den Faserverbundsektor.
- 3 Die Nutzung von thermoplastischen Faserbeimischungen als spätere Thermoplastmatrix in einem Faserverbundwerkstoff.
- 4 Die Vervollständigung einer weiteren im TITK komplett technisch/technologisch darstellbaren Prozesskette vom Produktionsabfall aus Hochleistungsfaserstoffen bis zum wertschöpfungsmaximierten Wiedereinsatz im Faserverbund-Leichtbausektor.
- 5 Die Nutzung von neuartigen Prüfverfahren zur Beurteilung der Qualität von Recyclingfaserstoffen für den Faserverbundsektor sowie zur Bestimmung erzielter Anisotropien in der Verstärkungswirkung mattenähnlicher Faserhalbzeuge

Die Projektergebnisse verfügen über das Potential, sowohl als Grundlage zur Überwachung von industriellen Fertigungslinien und als Bestandteil in Qualitätssicherungssystemen integriert zu werden. Durch die Erschließung eines neuen Verfahrens zur winkelgenauen Ablage längsorientierter Faserflore aus endlichen Verstärkungsfaserstoffen mittels eines speziellen Florlegeaggregates können entsprechend der späteren Anwendung lastgerechte Faserverbundwerkstoffe auch mit endlichen Verstärkungsfaserstoffen konstruiert werden. Dies erhöht und erweitert das Nutzungspotenzial von Natur- und Hochleistungsrecyclingfaserstoffen im Sinne einer höheren Wertschöpfung. Neben diesem industriellen Verwertungspotenzial wird die Leistungsfähigkeit des TITK im Bereich der Wiedernutzbarmachung von aus Produktionsabfällen gewinnbaren Verstärkungsfaserstoffen erhöht, um in diesem Bereich weitere F&E-Aufgaben zu bewältigen und industrielle Lösungen zu erarbeiten.

4.2 Zielgruppen für die verwertbaren Projektergebnisse

Zielgruppen für die Verwertung der Projektergebnisse sind generell alle Unternehmen, die sich mit Faserverbundwerkstoffen beschäftigen. Dies sind einerseits die Hersteller konventioneller Matten aus Naturfasern für den Faserverbundwerkstoffsektor, andererseits die Nutzer von Hochleistungsfaserstoffen in endlicher Form, wie sie beispielsweise aus Recyclingprozessen resultieren und für die aufgrund der hohen Primärfaserkosten eine maximale Wertschöpfung gefunden werden muss.

Die Zielgruppe für eine Nutzung der F&E-Projektergebnisse erstreckt sich so von:

- Mattenherstellern mit Einsatz von Naturfaserstoffen für Verstärkungshalbzeuge über
- Verbundwerkstoffhersteller im Sinne der Aufbereitung derzeit anfallender technologiebedingter Abfälle,
- Textile Verarbeiter von p-AR- und CF-Faserstoffen zur Aufbereitung von anfallenden Abfallmengen bis hin zu
- Unternehmen, die sich mit der Stoffkreislaufschließung im Sinne von Verstärkungsfaser – Verarbeitung – Bauteil – Nutzung – Alteil – Aufbereitung – Verstärkungsfaser beschäftigen (beispielsweise im Sinne der Altautoverordnung).

4.3 Markt- und Wettbewerbssituation

4.3.1 Markt- und Wettbewerbssituation für faserorientierte Karbon- und Aramidfasermatten

Nach wie vor gibt es einen hohen Entwicklungsdruck in der Industrie bezüglich des Leichtbaus [1]. Es werden in vielen Industriezweigen Entwicklungen angeschoben, die sich verstärkt mit dem Einsatz von faserverstärkten Verbundwerkstoffen beschäftigen. „Experten sehen im Automobilbau vor allem für CFK ein herausragendes Potenzial gegenüber allen anderen Werkstoffen.“ [1] Als erster Autohersteller setzt BMW Karbon in der Großserie ein und spielt damit eine revolutionäre Rolle im automobilen Leichtbau. [2] Hochleistungsfaserverstärkte Faserverbundwerkstoffe sind der Schlüssel für extremen Leichtbau; können doch mit ihnen 50% Gewichtseinsparung gegenüber herkömmlicher Stahlbauweise bei gleichzeitiger Erhöhung der Crashesicherheit um den Faktor 1,5 erreicht werden. [3] In der Flugzeugindustrie steigen die Anteile faserverstärkter Strukturen rasant an. Der Airbus A350 XWB besteht zu 53% aus CFK. Der neue 787 (Dreamliner) von Boeing besteht zu 50% aus CFK. [1] Für den Bereich der Windkraftanlagen werden heute bereits 23% der weltweiten Karbonfaserproduktion eingesetzt. [1] Dies sind Märkte, die einerseits große Mengen an Karbonfaserstoffen verarbeiten und damit auch orientierte Faserhalbzeugmatten potenzielle für ausgewählte Anwendungen einsetzen könnten, andererseits auch Erzeuger großer Abfallmengen sind, in deren Interesse eine Aufbereitung und möglichst hochwertige Wiederverwendung steht.

Die Zielmärkte für die Ergebnisse des konzipierten Forschungsprojektes sind damit sehr breit gefächert und können auf Basis der F&E-Ergebnisse solche Technologien als Baustein in komplette Verarbeitungsketten integrieren.

Ein weiterer Markt für die Nutzung der Ergebnisse sind Abfallrecycler. Sie agieren eigenständig am Markt außerhalb der o.g. Branchen. Sie kaufen analog der im klassischen Textilrecycling bekannten Reißereien Produktionsabfälle aus der Industrie, die sie zu vermarktungsfähigen Produkten aufbereiten. Mit der Kombination von mechanischen Recyclingverfahren und innovativer Mattenfertigung könnten auch hier neue Wege der Wiederverwertung industriell erschlossen werden.

Der weltweite Markt für CFK wuchs von 65.000 t im Jahr 2012 auf 74.000 t im Jahr 2013 und wird für 2015 auf 208.000 t prognostiziert [4].

Geht man davon aus, dass auf dem Weg von der Karbonfaser bis zum fertigen Bauteil mindestens 20% verwertbarer Abfälle entstehen, sind das weltweite Mengen in Größenordnungen mit den entsprechenden Wachstumsraten. In [8] wird die Zusammensetzung dieser Abfälle in folgender Übersicht charakterisiert:

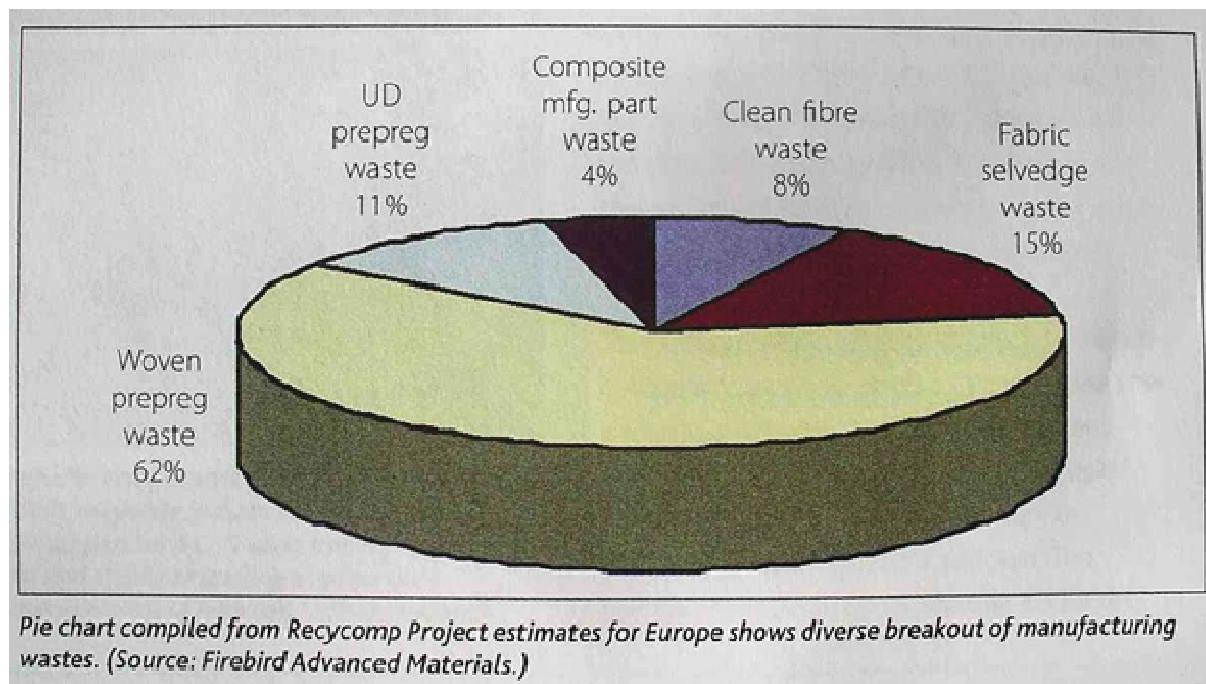


Bild 13: Profil von CF-Produktionsabfällen [5]

Wie aus diesem Bild hervorgeht, besteht der Hauptanteil mit 96% aus textilartigen Abfällen, die mit dem mechanischen Recyclingverfahren zu krempelbaren und damit gezielt orientierbaren Recyclingfasern aufbereitet werden könnten.

Die Verwendung von Aramidfaserstoffen konzentriert sich im Gegensatz zu Karbon auf eine Reihe anderer wichtiger Einsatzgebiete mit großen Mengenverbräuchen. Dies betrifft insbesondere den Hitzeschutz-, Schnittschutz- und Ballistikschtzsbereich. Bei Produktionsmengen von etwa 50.000 t/a wird nur ein sehr kleiner Anteil für den Faserverbundsektor verwendet. Meist erfolgt dies in Kombination mit anderen Verstärkungsfaserstoffen wie CF und Glas. In Europa stehen derzeit etwa 500 - 700 t verwertbarer textiler Abfälle für derartige orientierte Fasermatten mit winkelorientierter Faserausrichtung zur Verfügung, so dass darauf basierende Anwendungen sich nur auf kleintonnagige Spezialitäten beschränken.

Bezüglich der Wettbewerbssituation sind derzeit keine Matten aus endlichen Karbon- und Aramidfasern marktverfügbar, die eine gezielte und in definierten Winkeln orientierte Faserausrichtung aufweisen. Das Entwicklungsprodukt „Fasermatte mit hoch orientierter und definierter Winkellage von endlichen Recyclingfasern“ ist in diesem Bereich konkurrenzlos.

4.3.2 Markt- und Wettbewerbssituation für den Bereich Naturfaserstoffe

Im Bereich der Naturfaserstoffe als Kunststoffverstärkung findet man eine andere Situation vor. Hier setzt man bereits endliche Faserstoffe als Primärmaterial ein. Als Produktgruppe dominieren wrrr gelegte Fasermatten. Aufgrund der fehlenden Endlosstrukturen konnten diese endlichen Fasern bisher technisch nicht hoch und zielgerichtet im Faserverbundwerkstoff lastgerecht platziert werden. Das im Projekt entwickelte Verfahren zur Herstellung gezielt faserorientierter Fasermatten erhöht die Nutzbarkeit des Verstärkungspotentials der Naturfasern im Verbundbauteil. Aufgrund der nunmehr möglichen lastgerechten Orientierung von Naturfasern sind höhere Belastbarkeiten im

Faserverbundbauteil realisierbar oder im Sinne des Leichtbaus ist eine Bauteilverschlankeung und damit Massereduzierung umsetzbar.

Zielfmärkte sind die derzeitigen Hersteller von wirr gelegten Naturfasermatten, die mit dem konzipierten Lösungsansatz neuartige Verstärkungsfasermatten mit maßgeschneiderten Faserausrichtungen dem Faserverbundsektor bereitstellen könnten. Der Hauptzielmarkt wäre auch hier der Automobilbau als derzeitiger Vorreiter für naturfaserverstärkte Verbundbauteile. Auch andere Industriezweige wie die Möbelbranche und der Maschinen- und Anlagenbau werden als potentielle Anwender gesehen.

4.3.3 Marketing und Vertriebskonzeption

Das Marketing und das Vertriebskonzept konzentrieren sich auf folgende Bereiche:

Verstärkungsfasern	Markterschließungsrichtung
CF	Masseneinsatz für die hochwertige Wiederverwertung von Recyclingfasern mit einer Markteinführung im Automobilbau
AR	Nischeneinsatz für Spezialitäten meist in Mischung/Kombination mit anderen Verstärkungsfasernstoffen wie CF und GL
Naturfasern	Masseneinsatz von Primärfasern für den Automobilbau mit dem Potential für weitere Einsatzgebiete im Niedrigpreissektor

Der Vertrieb der Ergebnisse soll generell über folgende Schienen erfolgen:

- a) Know-how-Transfer zur Herstellung definierter, hoch orientierter und unter definierten Winkeln ablegbarer Verstärkungsfaserschichten aus endlichen Fasern auf Basis der Krempeltechnik in Kombination mit einem Spezialleger.
- b) Know-how-Transfer bezüglich neuer und angepasster Prüfverfahren zur Charakterisierung der Eigenschaften solcher neuartiger Mattenhalbzeuge
- c) Know-how-Transfer der Ergebnisse der Anlagentestung an den Maschinen- und Anlagenbauer zwecks Anlagenoptimierung

Über die üblichen Wege der Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, Vorstellung der Ergebnisse zu Fachkolloquien sowie in Firmenkontakten zu Vertretern der Vliesstoffbranche und Halbzeughersteller werden die Ergebnisse zur industriellen Nutzung angeboten.

4.3.4 Eigene Umsatzerwartungen und wirtschaftliche Effekte

Bezüglich der Vermarktung im TITK werden folgende Umsätze und wirtschaftliche Effekte erwartet:

Vermarktungspaket	2014	2015	2016	2017	2018	bis 2024
Eigene Umsätze aus Aufbereitung und Halbzeugfertigung	100.000,-	100.000,-	50.000,-	50.000,-	50.000,-	500.000,-
F&E-Folgeleistungen	100.000,-	100.000,-	100.000,-	100.000,-	100.000,-	500.000,-
Kosteneinsparungen im TITK durch Ergebnismutzung (Prüfmethoden, Verfahren)	20.000,-	20.000,-	20.000,-	20.000,-	20.000,-	200.000,-

Tabelle 4: Umsatzerwartung und wirtschaftliche Effekte der Nutzung der F&E-Ergebnisse im TITK [€]

4.3.5 Nutzung der F&E-Ergebnisse in Drittunternehmen

Bezüglich des Zeithorizontes dieses F&E-Projektes werden unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Aktivitäten auf diesen Märkten folgende wirtschaftlichen Effekte in Drittunternehmen abgeschätzt:

	2014	2015	2016	2017	2018	bis 2024
Rohstoffkosten	0	100.000,-	100.000,-	200.000,-	200.000,-	> 1.000.0000
Energiekosten (Verfahrens-anwendung, Leichtbau)	0	100.000,-	100.000,-	200.000,-	200.000,-	
Umwelteffekte durch Leichtbau, Ressourcenschonung/Abfallverwertung	0	100.000,-	100.000,-	200.000,-	200.000,-	

Tabelle 5: Umsatzerwartung und wirtschaftliche Effekte der Nutzung der F&E-Ergebnisse in Drittunternehmen [€]

4.3.6 Transferkonzeption

Um die F&E-Ergebnisse einer kommerziellen Verwertung zuzuführen, werden folgende Wege beschritten:

Über die Öffentlichkeitsarbeit des TITK

- Die Ergebnisse des F&E-Projektes werden in einem Bericht zusammengefasst, der interessierten Anwendern zur Verfügung gestellt werden kann.
- Weiterhin ist der Fachbericht in den Universitätsbibliotheken der Friedrich-Schiller-Universität in Jena sowie der Technischen Informationsbibliothek Hannover (TIB) öffentlich zugänglich.

- ▶ Die Projektergebnisse werden weiterhin in der Fachpresse veröffentlicht.
- ▶ Auf Messen wie der TECHTEX in Frankfurt oder der Materialica in München werden die Ergebnisse anhand von Fasermustern und Produktbeispielen gezeigt.
- ▶ Mittels Informationsflyer werden die Ergebnisse anschaulich und werbewirksam zusammengefasst. Diese Flyer werden auf Messen und Kundenbesuchen verbreitet. Weiterhin liegt dieses Material am Info-Stand im Haus des TITK frei aus.

Über Kooperationen mit Industriepartnern

Mit einem Hersteller von Verstärkungshalbzeugen für den Automobilbau wurde ein Kooperationsvertrag unterzeichnet. In diese gemeinsamen bilateralen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fließen die Ergebnisse dieses Projektes mit ein und werden zur Entwicklung neuer Produkte und Verfahren genutzt.

Über die Nutzung im eigenen Haus bzw. in Tochterunternehmen

Die im Rahmen des Projektes entwickelten neuen Prüfmethoden an Hochleistungsfaserstoffen und das Know-how zur Aufbereitung und Verarbeitung derartiger Fasermaterialien, insbesondere auf dem Gebiet der endlichen Karbonfaserstoffe werden im TITK e.V. zur Bearbeitung weiterer F&E-Projekte genutzt. Als Bestandteil des Know-hows der OMPG mbH als 100% Tochter des TITK dienen die Ergebnisse dazu, das Leistungsspektrum der Prüfdienste für die Industrie zu erweitern und weitere bilaterale Entwicklungsarbeiten mit der Industrie zu akquirieren.

Die Schwerpunkte des Ergebnistransfers richten sich auf folgende Aktivitäten:

- Entwicklung von Halbzeugen für Anwendungstests bei Industriepartnern
- Kundenorientierte Optimierung der Anlagentechnik und des Verfahrens in Zusammenarbeit mit dem Anlagenhersteller,
- Fertigung kleintechnischer Mengen für Industriekunden
- Beratung und Hilfestellung bei der Projektierung einer Produktionsanlage
- Beratung und Hilfestellung bei Inbetriebnahme der Anlage

5 Bewertung des aktualisierten Verwertungsplanes im Vergleich zum ursprünglichen Verwertungsplan

Der aktualisierte Verwertungsplan entspricht prinzipiell inhaltlich dem ursprünglichen Verwertungsplan. Der Markt insbesondere für den Bereich der Karbonfaserstoffe hat sich extrem dynamisch entwickelt. Seit November 2013 wird der BMW i3 in Deutschland verkauft. Hier wird erstmals ein Serienauto komplett aus Karbon gefertigt. [6] Damit wurde erstmals im großen Stil die Anwendung von bisher exklusiven Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen in den Massenmarkt vollzogen. In Vorbereitung dieser Entwicklung wurden im Jahre 2009 von der BMW Group und der SGL Group das Joint Venture SGL Automotive Carbon Fibers (ACF) zum Zwecke der exklusiven Versorgung der BMW Group mit Karbonfaser-Materialien gegründet. Parallel dazu wurden hier Recyclingkonzepte entwickelt, um die anfallenden Produktionsabfälle wieder stofflich zu verwerten. Das folgende Schema veranschaulicht dieses praktizierte ganzheitliche Prinzip:

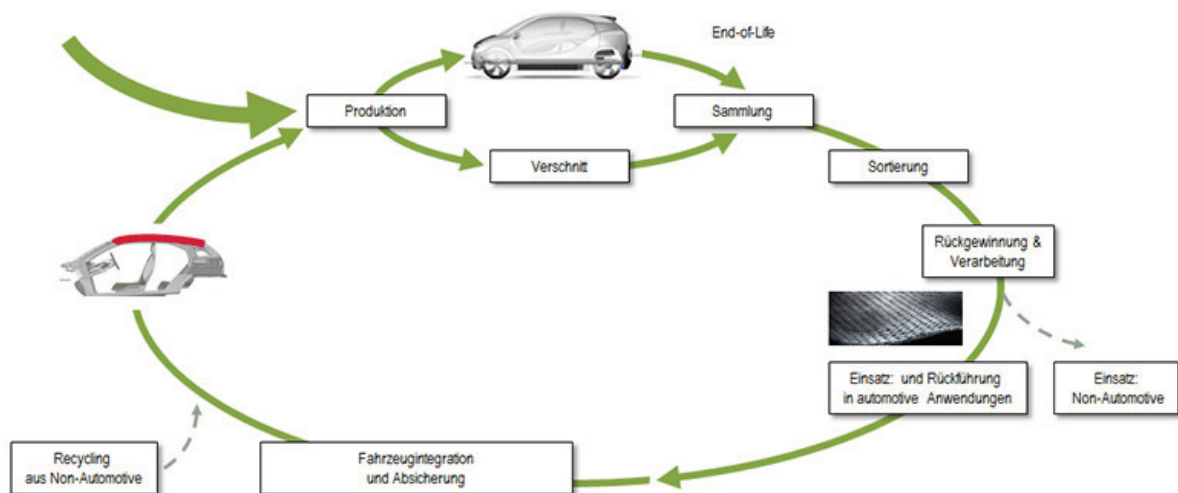


Bild 14: „Recycling - ein Kernelement für die Verbreitung von CFK in der Automobilindustrie“
[7]

Bereits in der Phase der Projektbearbeitung gab es Kontakte zur Fa. SGL Automotive Carbon Fibers, um Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt in die Praxis zu überführen. Bei der Bearbeitung von Forschungsdienstleistungen werden bereits heute Teilergebnisse aus diesem F&E-Projekt im TITK und ihrem Tochterunternehmen der OMPG mbH genutzt.

Auch für den Bereich der Nutzung von Ergebnissen im Bereich der naturfaserverstärkten Faserverbundwerkstoffen wurden erste Kontakte zu Firmen der Automobilzulieferbranche geknüpft.

6 Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse

Im Rahmen aller Aktivitäten zum mechanischen Recycling von Hochleistungsfaserstoffen und deren Verarbeitung zu Halbzeugen für den Faserverbundsektor wurden in den letzten Jahren folgende Patente angemeldet:

PUB.-NUMMER	KURZTITEL
DE102009023641	Vorrichtung zum Auftrennen textiler Faserbündel in Einzelfasern
DE112010006029	Vorrichtung zum Auftrennen textiler Faserbündel
DE102009055912	Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von Stapelfasergelegen aus endlich langen Verstärkungsfasern mit gerichteter Faserorientierung
DE102012100527	Verfahren zur Herstellung von umhüllten, faserhaltigen Schüttkörpern
DE102012100637	Verfahren zur kontinuierlichen Dosierung von Stapelfasern an Schneckenmaschinen
DE 2010 008 370	Verfahren zur Herstellung eines plattenförmigen Halbzeugs aus Faserverbundwerkstoff

Tabelle 6: Schutzrechte zur Thematik Recycling und Wiederverwertung von Hochleistungsfaserstoffen im Faserverbundsektor

Mit diesen Patenten werden auch die in diesem Projekt erarbeiteten Neuheiten abgesichert. Neue Patente im Rahmen des Projektes wurden nicht angemeldet.

7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Inhaltlich werden die Projektergebnisse in den Komplex der Öffentlichkeitsarbeiten des TITK integriert. Neben den Portalen Homepage, Fachpresse und Fachmessen werden Mitarbeiter kooperierender Firmen insbesondere im Umgang mit sensiblen Prozessfaserstoffen und Sonderprüfverfahren geschult und in Verarbeitungsprozesse eingewiesen.

Der Fachbericht ist weiterhin in den Universitätsbibliotheken der Friedrich-Schiller-Universität in Jena sowie in der Technischen Informationsbibliothek Hannover (TIB) öffentlich zugänglich.

Literaturquellen

- [1] ... anonym: „Composites Europe weiter auf Wachstumskurs“
K-Zeitung 10, 2. August 2013
- [2] ... www.bmw.com/com/de/newvehicles/i/i3/2013/showroom/
- [3] ... Elsevier Ltd.
"Carbon fibre composites poised for dramatic growth"
Reinforced Plastics May 2009, p. 16 - 21
- [4] ... anonym:
"Composites legen weiter zu" K-Zeitung 20, 11.10.2013 S. 1-2
- [5] ... McConnell, V.P.
"Launching the carbon fibre recycling industry"
Reinforced Plastics, March/April 2010 p. 33 – 37
- [6] ... <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/weltpremiere-bmw-praesentiert-elektroauto-i3-a-913614.html>
- [7] ... <http://www.sglacf.com/erzeugnisse/recycling-produkte.html>